

小型アキシャルピストンポンプを用いた水中グライダー用 浮力エンジンの開発

正 会 員 浅 川 賢 一*
大 内 英 俊**

渡 健 介*

Development of a Buoyancy Engine for Underwater Gliders using a Small Axial Piston Pump

by Kenichi Asakawa, *Member* Kensuke Watari
Hidetoshi Ohuchi

Key Words: Buoyancy Engine, Underwater Glider, Axial Piston Pump, Long-term Observation

1. 緒 言

海洋の水温や CO_2 炭素濃度変動は、地球環境変動を左右する大きな要因である。地球温暖化の本質を理解し長期的見通しを得るためには、深海を含めた海洋の環境変動を長期的に観測することが重要である。

現在、深海までの海洋環境観測は、プロファイリングフロートやブイシステム、観測船などによって行われている。特に、アルゴフロートは現在約3600台が全世界に展開され、水深2,000mまでの水温・塩分などの観測を行ない、準リアルタイムで全世界に配信している。海洋研究開発機構でも、水深4,000mまでの観測が可能なプロファイリングフロート‘Deep NINJA’¹⁾を開発した。

また、近年水中グライダー²⁾が新しい観測プラットフォームとして注目されるようになってきた。この水中グライダーはプロファイリングフロートと同様に浮力エンジンを用いて、沈降と浮上を繰り返す。同時に、翼に生じる揚力を利用して海中を滑走しながら、長時間に渡って観測を行う。現在使われている水中グライダーは空中重量が約50kgと軽量であるが、大西洋横断も可能である³⁾。海洋研究開発機構でも、一定海域において数年間に渡って観測が可能なバーチャルモアリング用水中グライダーの開発を進めている。

プロファイリングフロートと水中グライダーでは浮力エンジンを用いて、耐圧容器外のブラダ内の油を出し入れして体積を変えることにより浮力調整を行ない、下降と浮上を行っている。エネルギー効率が大きく、アルゴフロートでは4~5年の観測を行っている。これまで、海洋研究開発機構では、Deep NINJA 用にピストンポンプ式の浮力エンジンを開発し、利用している。

今回筆者らは、市販の小型アキシャルピストンポンプを使った新しい浮力エンジンを試作し基礎的な実験を行い、8MPa以下の圧力で良好に動作することを確認した。この浮力エンジンは、水中グライダーへの利用を想定したものである。従来のピストン式浮力エンジンと比較し

て、速度は一桁以上向上し、寸法、重量も半分程度となった。本講演では、まず、本浮力エンジンを搭載するバーチャルモアリング用水中グライダーの概要を紹介し、その後新型浮力エンジンの構成と基礎的な実験結果について報告する。

2. バーチャルモアリング用水中グライダー

開発を進めているバーチャルモアリング用水中グライダーについては、すでに本講演会においてその背景、目的、構造等を報告している⁴⁾、ここでは簡単にその概要を紹介する。

図1と図2はそれぞれ外観とオペレーションのイメージを示したものである。通常的水中グライダーと同様に翼を利用して水中を滑走する。内蔵の電池を移動することにより、その重心位置を変えて、姿勢と方位を制御す



Fig. 1 Photo of the underwater glider

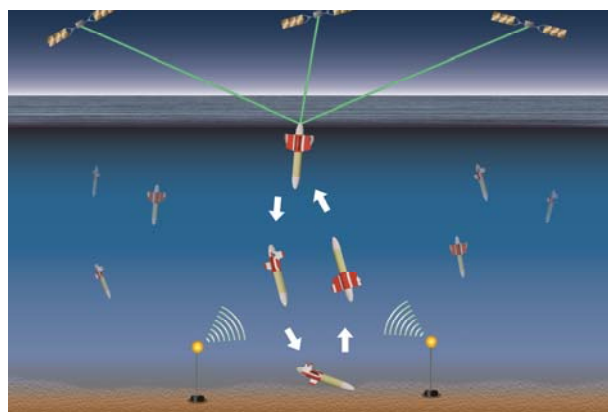


Fig. 2 Operation image of the underwater glider for virtual mooring⁴⁾

* 海洋研究開発機構 海洋工学センター

** 山梨大学 大学院医学工学総合研究部

る。海底に着底して一定期間スリープすることにより、観測時間を延長し、1年以上の長期観測を実現する予定である。海底まで到達できない場合は、プロファイリングフロートと同様に、海中で浮遊しながらスリープする。水面浮上時にイリジウム経由でデータを伝送するとともに、GPSで測位する。所定の海域の外に出た場合には、目標地点に向かって海中を滑走し、一定海域内に留まる。適用可能海域を広げるため、最大水深は3000mとした。全長と空中重量はそれぞれ約2.5m、150kgである。

3. 新浮力エンジンの構成とその基礎的特性

3.1 従来の浮力エンジン

本水中グライダーには、これまでピストンポンプ式の浮力エンジンを搭載していた。この浮力エンジン全体の油圧回路をFig. 3に、外観をFig. 4に示す。ピストンポンプは、Deep NINJA用に開発されたものである。ピストンの容量は50mL、最大圧力は40MPaである。一回の押し出しと引き込みに要する時間は、約5分から7分程度である。

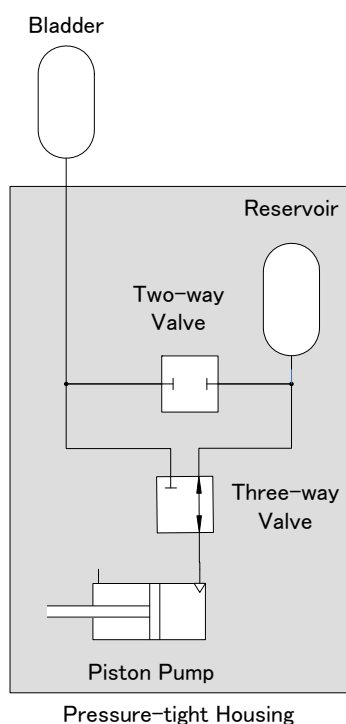


Fig. 3 Basic hydraulic circuit of the old buoyancy engine.

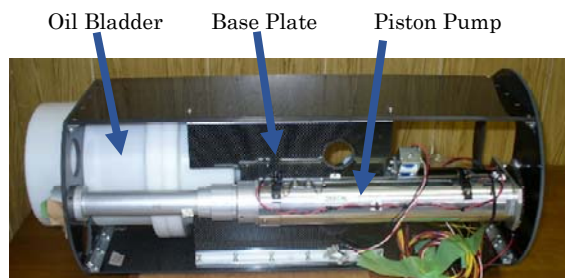


Fig. 4 Photo of the old buoyancy engine.

オイルリザーバには Sea Glider⁵⁾と同様にローリングダイアフラムを用いた。このローリングダイアフラムはFig4のプラスチック製円筒容器(白色)内部に収容されている。油量は、リニアポテンショメータで、ローリングダイアフラムの変位量を測定することにより推定している。最大容積は2,500mLである。



Fig. 5 Photo of the oil-bladder

オイルブラダには、市販のアクムレータ用のゴム袋(Fig. 5)を用いている。最大容量は、オイルブラダと同じ2,500mLである。

2方弁と3方弁はFig. 4のベースプレートの反対側に固定されている。

オイルブラダ以外は、耐圧容器内部に配置されている。油を引き込むときには、Alace⁶⁾と同様に、耐圧容器内外の圧力差を利用し、2方弁を介して油を引き込む。そのため、耐圧容器内部は0.7気圧程度に減圧している。

この浮力エンジン用ピストンポンプは構造が単純であるため、比較的高い電力効率を持っている。また、精密な浮力制御が可能である。

3.2 アキシシャルピストンポンプを用いた浮力エンジンの構成

水中グライダーの制御性能を高めるために、水中グライダー用の浮力エンジンには、高速であることが求められる。さらに、小型、軽量で電力効率が高く、高信頼性を持つことも重要である。

そこで、筆者らは市販の小型アキシシャルピストンポンプ((株)タカコ、THF-080)を使った浮力エンジンを試作し、基本的な性能を評価した。

Fig. 6は新浮力エンジンの基本的油圧回路を示したものである。モータにはマクソン社のブラシレスモータEC45(250W)を用いている。油をブラダに押し出す場合は、チェックバルブを介して油をブラダに送り出している。油を引き込む時は、2方弁を解放して油の通路を作っている。水中グライダーが潜水している場合には、ブラダには水圧が加わる。従って、潜水中に油を引き込む場合は、油圧ポンプは油圧モータとして動作し、モータは発電機として動作する。モータの駆動回路は、この回生電力を吸収する必要がある。筆者らは、マクソンのモータ

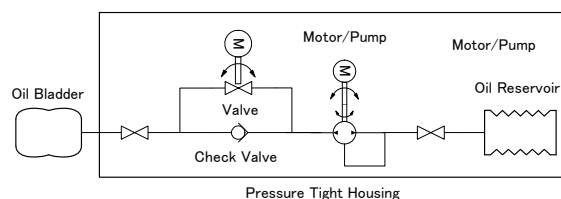


Fig. 6 Block diagram of the new buoyancy engine using a axial piston pump.

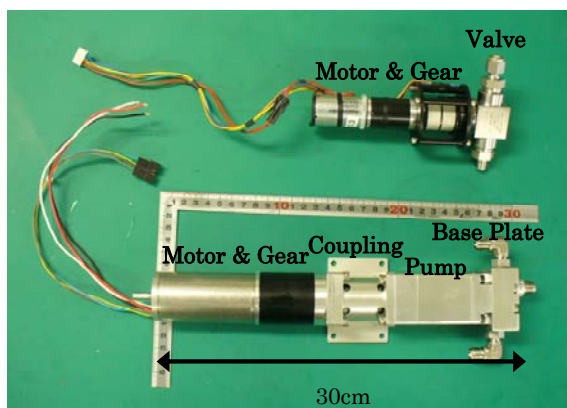


Fig. 7 Photo of the new buoyancy engine using a axial piston pump.

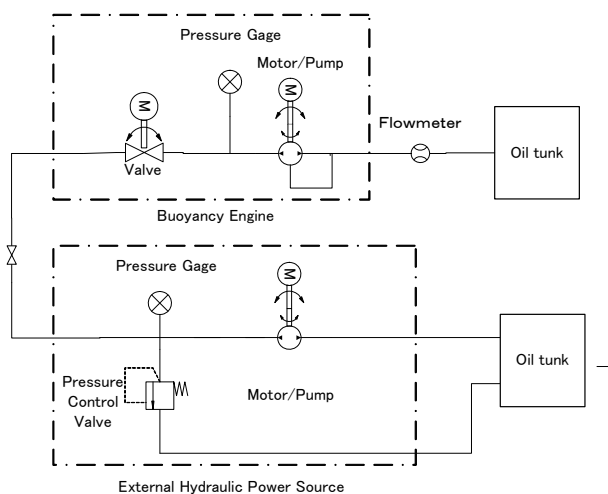


Fig. 8 Basic experimental apparatus of the new buoyancy engine

制御回路 4-Q-EC Amplifier とシャントレギュレータ DSR 50/5 を用いて、この課題に対処した。

Fig. 7 は新浮力エンジンの主要部分の外観である。寸法、重量ともに、従来の浮力エンジンの約 1/2 にすることができた。

従来の浮力エンジンでは、水面浮上時に油を引き込む時に、ピストンポンプを介さずに、耐圧容器内外の圧力差を利用して油を引き込んだ。新浮力エンジンでは、制御を単純化するために、油の引き込みもポンプを介して行っている。

この浮力エンジンの基本的性能を確認するために、室内において基礎的な実験を行った。Fig. 8 はその基本構成を示したものである。水圧に相当する圧力を負荷として加えるために、外部油圧ユニットを使用した。この外部油圧ユニットで圧力負荷を加えた状態で、浮力エンジンに相当する油圧ポンプを駆動し、その消費電力や油押し出し/引き込み特性を測定した。この実験では、チェックバルブは使用していない。浮力エンジンに相当する油圧ポンプの駆動と同期して電動バルブを開閉している。制御は PIC マイコンにより行っているため、電動バルブと油圧ポンプの ON/OFF の同期は安定している。実験装置の関係で、負荷圧力は 8MPa 以下の範囲で実験した。

圧力負荷を加えた状態でのポンプの駆動時間と押し出

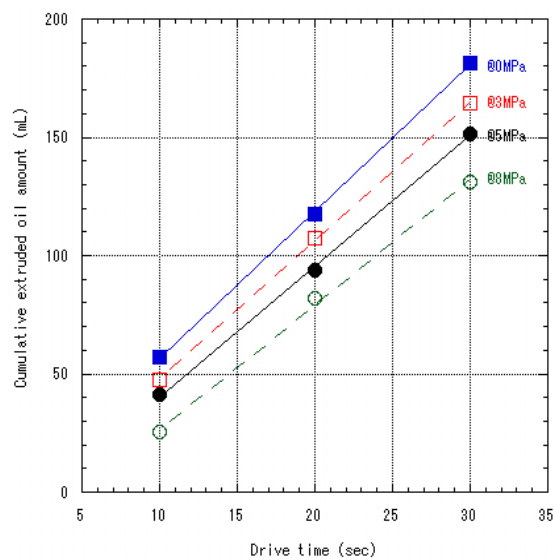


Fig. 9 Basic characteristics of the oil-extrusion under pressure

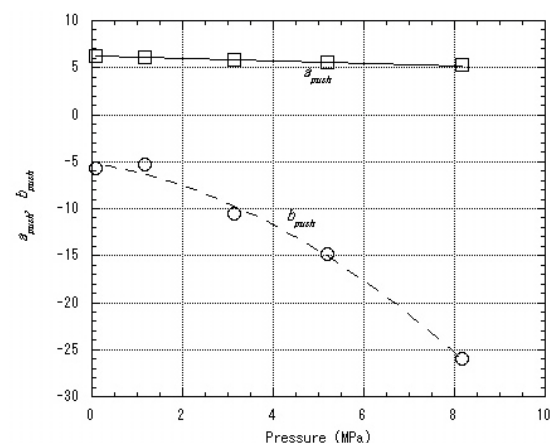


Fig. 10 Coefficients of the oil-extrusion under pressure

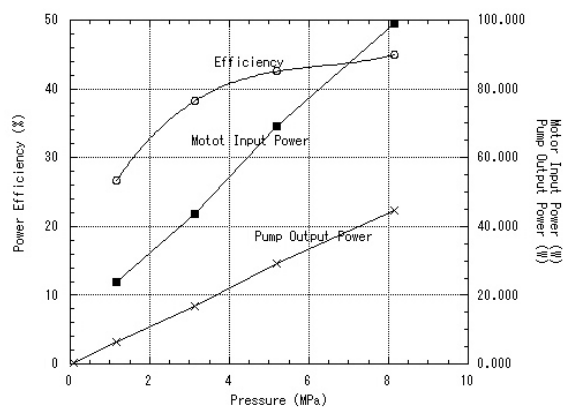


Fig. 11 Power efficiency of the oil-extrusion under pressure

した油量の関係を Fig. 9 に示す。油の押し出し速度は、5mL/sec 前後である。

ポンプと電動バルブの駆動と停止に一定の時間を要するので、駆動時間と押し出し量は完全には比例しない。押し出し量と駆動時間をそれぞれ O_{push} (mL) と t (sec) とすると、その間には次式であらわされる線形な関係がある。

$$O_{push} = a_{push}(p)t + b_{push}(p) \quad (1)$$

ここで、 $a_{push}(p)$ と $b_{push}(p)$ は圧力に依存する係数である。その $a_{push}(p)$ と $b_{push}(p)$ の圧力依存性を Fig. 10 に示す。 $a_{push}(p)$ の圧力依存性は比較的小さいが、 $b_{push}(p)$ は圧力に依存することが明らかである。また、 $b_{push}(p)$ の符号が負であることは、油が負荷圧力で押し戻されることを示唆している。高压時では、無視できない量である。この油の押し戻しは、ポンプの起動時と停止時に発生する。油の押し戻しは、Fig. 6 に示すチェック弁を挿入することにより、防止することができる。なお、チェック弁を用いることにより、ポンプの定格である 21MPa まで押し出し動作が可能であることを確認している。

Fig. 11 は油の押し出し時の電力効率を示したものである。良好な電力効率を得られていることが確認できる。なお、この電力には、電源回路とモータドライブ回路の損失は含まれていない。

次に、負荷圧力が加わった状態での油の引き込み特性を測定した。測定結果を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。油の押し出しと同じように、 $a_{pull}(p)$ の圧力依存性は比較的小さいが、 $b_{pull}(p)$ は圧力に依存することが明らかである。

上記の実験データからも推測できるが、アキシシャルポンプは、低速回転時に高压の負荷圧力が加わると、圧力ポートと低压ポートの間に油の通路が生じ、油が高压側から低压側に流れる。この現象は、圧力が高压になると、より顕著に現れる。8MPa 程度以上の負荷圧力が加わった時、特に油引き込み時に高速回転状態でもこの現象が現れ、油の引き込み動作に大きな影響を与えることが実験の結果明らかになっている。この現象に対応するため、高压負荷が加わっているときには、油圧ポンプを介さずに、流量制御弁あるいはオリフィスを介して油を引き込むことを検討している。

4. 結語

筆者らは、市販のアキシシャルポンプを利用した浮力エンジンを試作し、室内でその基本的特性を評価した。その結果、8MPa 以下の圧力では、効率良く油の押し出しと引き込みができることを確認した。また、チェック弁を用いることにより、21MPa の圧力まで押し出し動作が可能であることを確認している。

8MPa 以上の高压では、油の引き込み時に課題が残されているので、今後改善する予定である。

本研究は JSPS 科研費 24246146 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 小林大洋, 雨池健一, 渡辺和博, 伊野哲郎, 浅川賢一, 須賀利雄, 河野健, 百留忠洋: 深海用プロファイリングフロート「Deep NINJA」の開発 (その2), 海洋調査技術学会第 25 回研究成果発表会予稿集, 2013. 印刷中

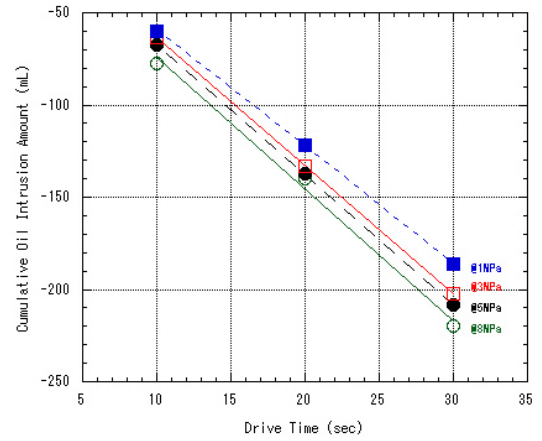


Fig. 12 Basic characteristics of the oil-draw-in under pressure

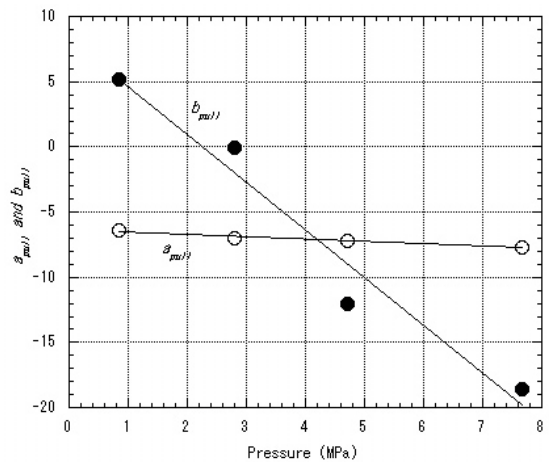


Fig. 13 Coefficients of the oil-draw-in under pressure

- 2) Daniel L. Rudnick et. al., "Underwater Gliders for Ocean Research," Marine Technology Society J., vol. 38, no. 2, pp. 73-84, 2004.
- 3) Ari Shapiro, "Remotely Piloted Underwater Glider Crossing the Atlantic," IEEE Spectrum, March 2010, <http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/remotely-piloted-underwater-glider-crosses-the-atlantic/0>
- 4) 浅川賢一, 百留忠洋, 渡辺佳孝, 小林大洋, 中野善之, 中村昌彦, 伊藤譲, 小島淳一: 定域長期観測用シャトルビークル「ツクヨミ」の概要, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 14 号, pp.479-482, 2012.
- 5) Charles C. Eriksen, T. James Osse, Russell D. Light, Timothy Wen, Thomas W. Lehman, Peter L. Sabin, John W. Ballard, and Andrew M. Chiodi, "Seaglider: A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research," IEEE J. of Ocean. Eng., vol. 26, no. 4, pp. 424-436, 2001.
- 6) R. E. Davis, D. C. Webb, L. A. Regier, and J. Dufour, The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE), J. of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 9, pp.264-285, 1992.